

JP2002098634

Publication Title:

**ELECTRICAL CHARACTERISTIC EVALUATION APPARATUS AND METHOD
FOR SEMICONDUCTOR**

Abstract:

Abstract of JP2002098634

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an electrical characteristic evaluation apparatus and method which achieve a measurement and an inspection of electrophysical quantities (carrier density, movability, resistance rate, electric conductivity, etc.), of a semiconductor material to be measured without contaminating nor scratching it. **SOLUTION:** A terahertz pulse light source 2 is provided to irradiate a semiconductor material 5 with terahertz pulse light, a photodetecting means 6 to detect the transmission pulse light or the reflected pulse light from the semiconductor material 5, terahertz time region measuring means 7 and 8 to obtain a spectral transmission factor or a spectral reflection factor from a time series waveform of the intensity of the electric field of the transmission pulse light or the reflected pulse light and an arithmetic means 9 to calculate an electrical characteristic parameter of the semiconductor material based on the spectral transmission factor or the spectral reflection factor.

Data supplied from the esp@cenet database - Worldwide

Courtesy of <http://v3.espacenet.com>

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-98634

(P2002-98634A)

(43) 公開日 平成14年4月5日(2002.4.5)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テ-マ-ト*(参考)

G 0 1 N 21/35

G 0 1 N 21/35

Z 2 G 0 5 9

21/17

6 2 0

21/17

6 2 0

4 M 1 0 6

H 0 1 L 21/66

H 0 1 L 21/66

N

M

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 16 頁)

(21) 出願番号 特願2000-282497(P2000-282497)

(22) 出願日 平成12年9月18日(2000.9.18)

(31) 優先権主張番号 特願2000-85982(P2000-85982)

(32) 優先日 平成12年3月27日(2000.3.27)

(33) 優先権主張国 日本(J P)

(31) 優先権主張番号 特願2000-218673(P2000-218673)

(32) 優先日 平成12年7月19日(2000.7.19)

(33) 優先権主張国 日本(J P)

(71) 出願人 592171153

株式会社栃木ニコン

栃木県大田原市実取770番地

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 深澤 亮一

栃木県大田原市実取770番地 株式会社栃

木ニコン内

(74) 代理人 100077718

弁理士 古谷 史旺

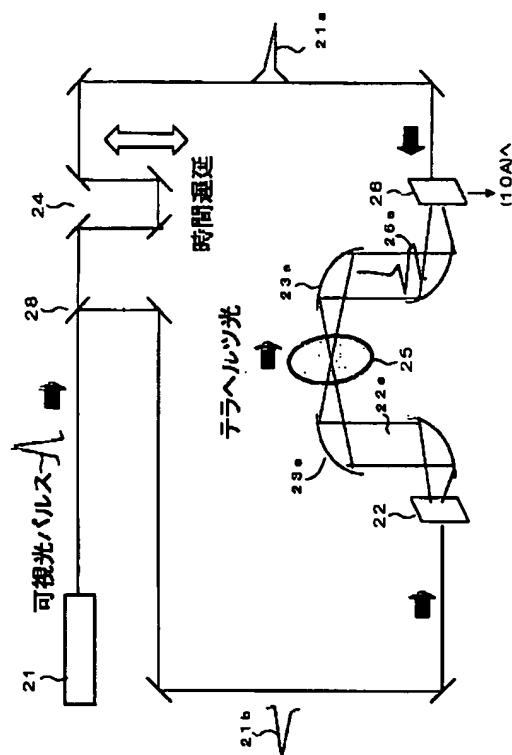
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体の電気特性評価装置および電気特性評価方法

(57) 【要約】

【課題】 被測定物である半導体材料を汚染したりキズを付けたりしないで、その電気的物性量(キャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度など)を測定・検査する電気特性評価装置および電気特性評価方法を提供すること。

【解決手段】 テラヘルツパルス光を半導体材料5に照射するテラヘルツパルス光源2と、半導体材料5からの透過パルス光または反射パルス光を検出する光検出手段6と、透過パルス光または反射パルス光の電場強度の時系列波形から分光透過率または分光反射率を得るテラヘルツ時間領域計測手段7、8と、分光透過率または分光反射率に基づいてその半導体材料の電気的特性パラメータを算出する演算手段9とを備える。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 テラヘルツパルス光を半導体材料に照射するテラヘルツパルス光源と、

前記半導体材料からの透過パルス光または反射パルス光を検出する光検出手段と、

前記透過パルス光または反射パルス光の電場強度の時系列波形から分光透過率または分光反射率を得るテラヘルツ時間領域計測手段と、

前記分光透過率または分光反射率に基づいて前記半導体材料の電気的特性パラメータを算出する演算手段とを備えたことを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項2】 請求項1に記載の半導体の電気特性評価装置において、

前記演算手段は、ドルーデの光吸収理論に基づく解析手法を実行することを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項3】 請求項1に記載の半導体の電気特性評価装置において、

前記演算手段は、誘電関数理論に基づく解析手法を実行することを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項4】 請求項1から請求項3の何れか1項に記載の半導体の電気特性評価装置において、

前記電気的特性パラメータを空間的分布として二次元画像化する画像処理手段をさらに備えたことを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項5】 請求項1から請求項4の何れか1項に記載の半導体の電気特性評価装置において、

前記テラヘルツパルス光を集光して集光光束を前記半導体材料に導く集光光学系と、

前記集光光束と前記半導体材料とを前記半導体材料の表面内で相対的に移動させる機械的走査機構とをさらに備えたことを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項6】 請求項1から請求項4の何れか1項に記載の半導体の電気特性評価装置において、

前記テラヘルツパルス光の径を拡大して拡大光束を前記半導体材料の全面に一括で導く拡大光学系をさらに備え、

前記光検出手段は、前記拡大光束により照射された前記半導体材料からの透過パルス光または反射パルス光を二次元的に検出する二次元光検出手段であることを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項7】 請求項5に記載の半導体の電気特性評価装置において、

前記集光光束と前記半導体材料とを相対的に回転させる回転機構と、各々の回転角度における複数の前記二次元画像から三次元断層像を合成するコンピュータグラフィック手段とをさらに備えたことを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項8】 請求項6に記載の半導体の電気特性評価装置において、

前記拡大光束と前記半導体材料とを相対的に回転させる回転機構と、

各々の回転角度における複数の前記二次元画像から三次元断層像を合成するコンピュータグラフィック手段とをさらに備えたことを特徴とする半導体の電気特性評価装置。

【請求項9】 テラヘルツパルス光を集光して集光光束を半導体材料に照射し、前記集光光束と前記半導体材料とを前記半導体材料の表面内で相対的に移動させ、前記半導体材料の各点からの透過パルス光または反射パルス光を順次検出し、前記透過パルス光または反射パルス光の電場強度の時系列波形からそれぞれ分光透過率または分光反射率を算出し、前記分光透過率または分光反射率に基づいて前記半導体材料の電気的特性パラメータを算出することを特徴とする半導体の電気特性評価方法。

【請求項10】 テラヘルツパルス光の径を拡大して拡大光束を半導体材料の全面に一括照射し、前記拡大光束が照射された前記半導体材料からの透過パルス光または反射パルス光を一括で検出し、前記透過パルス光または反射パルス光の電場強度の時系列波形からそれぞれ分光透過率または分光反射率を算出し、前記分光透過率または分光反射率に基づいて前記半導体材料の電気的特性パラメータを算出することを特徴とする半導体の電気特性評価方法。

【請求項11】 請求項9または請求項10に記載の半導体の電気特性評価方法において、

前記透過パルス光または前記反射パルス光を検出する光路に前記半導体材料を挿入した状態での前記電場強度の時系列波形と、前記検出する光路から前記半導体材料を取り除いた状態での電場強度の時系列波形とに基づいて、前記分光透過率または前記分光反射率を算出することを特徴とする半導体の電気特性評価方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、半導体ウェハ、インゴット、エピタキシャル成長膜などの半導体材料のキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度などの電気特性を非破壊かつ非接触で測定し、画像化する電気特性評価装置および電気特性評価方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】半導体デバイス産業において、デバイスを作製する半導体材料の電気的特性に係わるキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度などの物性量は半導体デバイスの性能を左右する重要な因子となっている。従来、これらの物性量の測定は、四探針法などの電気的測定法で行われている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】従来の電気的測定法は多くの場合、半導体材料を測定しやすいように加工したり、測定器の測定端子を電気的に半導体材料に接触させ

て測定していた。したがって、測定後には被測定物たる半導体材料を使用できなくなったり、汚染やキズなどの原因となっていた。さらに、従来の電氣的測定においては、測定端子間の平均的な物性量は測定できるが、材料全体における物性量の空間的分布を測定するには長時間を要し、また、物性量の空間的分布（特に不均一性）に関する情報をイメージとして捉えることは困難であった。

【0004】本発明は、被測定物を汚染したりキズを付けたりしないで、その電氣的物性量を測定・検査する電気特性評価装置および電気特性評価方法を提供することを目的とする。

【0005】

【課題を解決するための手段】本発明の半導体の電気特性評価装置は、テラヘルツパルス光を半導体材料に照射するテラヘルツパルス光源と、半導体材料からの透過パルス光または反射パルス光を検出する光検出手段と、透過パルス光または反射パルス光の電場強度の時系列波形から分光透過率または分光反射率を得るテラヘルツ時間領域計測手段と、分光透過率または分光反射率に基づいてその半導体材料の電氣的特性パラメータを算出する演算手段と、を備えて構成される（請求項1）。

【0006】前記演算手段は、ドルーデの光吸収理論に基づく解析手法を実行するように構成することができる（請求項2）。また、前記演算手段は、誘電関数理論に基づく解析手法を実行するように構成できる（請求項3）。さらに、本発明の半導体の電気特性評価装置は、電氣的特性パラメータを空間的分布として二次元画像化する画像処理手段をさらに備えることができる（請求項4）。また、本発明の半導体の電気特性評価装置は、集光されたテラヘルツパルス光束が半導体材料の表面を二次元的に走査するように構成してもよい（請求項5）、テラヘルツパルス光の径を拡大して、半導体材料に対して一括照射するように構成してもよい（請求項6）。さらに、本発明の半導体の電気特性評価装置は、半導体材料に導く光束（集光光束または拡大光束）と半導体材料とを相対的に回転させる回転機構と、各々の回転角度における複数の二次元画像から三次元断層像を合成するコンピュータグラフィック手段とをさらに備えることができる（請求項7、請求項8）。

【0007】また、本発明の半導体の電気特性評価方法は、テラヘルツパルス光を集光して集光光束を半導体材料に照射し、集光光束と半導体材料とを半導体材料の表面内で相対的に移動させ、半導体材料の各点からの透過パルス光または反射パルス光を順次検出し、透過パルス光または反射パルス光の電場強度の時系列波形からそれぞれ分光透過率または分光反射率を算出し、分光透過率または分光反射率に基づいて半導体材料の電氣的特性パラメータを算出するものである（請求項9）。

【0008】さらに、本発明の半導体の電気特性評価方

法は、テラヘルツパルス光の径を拡大して拡大光束を半導体材料の全面に一括照射し、拡大光束が照射された半導体材料からの透過パルス光または反射パルス光を一括で検出し、上記方法と同様に、分光透過率または分光反射率を算出し、半導体材料の電氣的特性パラメータを算出するものである（請求項10）。

【0009】また、本発明の半導体の電気特性評価方法は、透過パルス光または反射パルス光を検出する光路に半導体材料を挿入した状態での電場強度の時系列波形と、検出する光路から半導体材料を取り除いた状態での電場強度の時系列波形とに基づいて、分光透過率または分光反射率を算出するものである（請求項11）。

【0010】

【発明の実施の形態】以下、図面を用いて本発明の実施形態を詳細に説明する。

【0011】本発明は、テラヘルツ周波数領域のパルス光（テラヘルツパルス光）を半導体材料に照射し、その透過パルス光または反射パルス光を検出し、各々から分光透過率または分光反射率（分光特性）を演算し、半導体材料の電気特性パラメータを測定・評価する電気特性評価装置である。さらに、透過パルス光または反射パルス光の二次元分布（電場強度分布）、すなわち透過イメージまたは反射イメージから、半導体材料の電気特性に係わる物性量の空間イメージを光の波長オーダーの分解能で再生することも可能である。具体的には、透過イメージまたは反射イメージの時間的変化を測定し、これをフーリエ変換して周波数毎の二次元投影画像（分光画像）を得て、その分光画像を解析することによって、半導体材料の電気特性パラメータの分布を測定し、電気特性を検査するものである。

【0012】上記解析手法として、後述するドルーデ（Drude）の光吸収理論を用いる場合を例に説明する。本発明の電気特性評価装置で用いられるテラヘルツパルス光としては、 $0.1 \times 10^{12} \text{ Hz} \sim 80 \times 10^{12} \text{ Hz}$ の周波数領域の光が望ましい。テラヘルツパルス光を用いて半導体材料の透過イメージまたは反射イメージを得る測光光学系として、走査型イメージング光学系と非走査型イメージング光学系の二種類の光学系がある。

【0013】図1は、テラヘルツパルス光を半導体材料の一点に集光して照射する走査型イメージング測光方式を説明するための模式図である。以下、透過イメージを得る方式を例として説明する。不図示のテラヘルツパルス光源から半導体材料5に照射された集光光束（テラヘルツパルス光）は、半導体材料5の一点（画素 a_{ij} ）を透過してテラヘルツパルス検出器6（光検出手段）に達する。テラヘルツパルス検出器6は、1つの画素に相当する受光面を有する。半導体材料5の一点（画素 a_{ij} ）からの透過パルス光は、半導体材料5の電氣的特性に応じて発生した光である。この透過パルス光のパルス幅は、通常、半導体材料5に照射されるテラヘルツパルス

光のパルス幅に比べて長くなっている。

【0014】テラヘルツパルス検出器6では、半導体材料5からの透過パルス光を受光し、透過パルス光の電場強度 $E(i, j)$ に比例する信号をコンピュータ10A(後述する)に出力する。次に、テラヘルツ時間領域計測手段によって如何に電場強度の時系列波形が計測されるのかを説明する。図2は、時系列波形計測の原理を説明するためのブロック図(a)および時系列波形の一例を示すグラフ(b)である。

【0015】時刻 t_0 に、入力パルスによってテラヘルツパルス光源2からパルス光(テラヘルツパルス光)が放射され、半導体材料5を透過した透過パルス光5aがテラヘルツパルス検出器6に達する。入力パルスとは、テラヘルツパルス光を発生させるために、レーザー21からテラヘルツパルス光源2へ入力されるパルスである(後述する)。

【0016】一方、この入力パルスは、透過パルス光5aの電場強度の時系列波形を計測するためのサンプリングパルスとして、時間遅延装置27を経由してテラヘルツパルス検出器6に送られる。テラヘルツパルス検出器6では、サンプリングパルスが送られた時点での透過パルス光5aの電場強度を読み出し、コンピュータ10Aに出力する。

【0017】サンプリングパルスを送るタイミングを時間遅延装置27により Δt だけ遅らせると、テラヘルツパルス検出器6は、時刻 $t_0 + \Delta t$ における透過パルス光5aの電場強度 $E(t_0 + \Delta t)$ を読み出す(図2(b)参照)。このようにして、時間遅延装置27における遅延時間 Δt を変えることによって、任意の時刻 t における電場強度 $E(t)$ を求めることができ、透過パルス光5aの電場強度の時系列波形が得られる。

【0018】続いて、本発明の電気特性評価装置の主要構成について説明する。図3は、本発明の走査型イメージング手法による電気特性評価装置の概略構成図である。測定室1は、テラヘルツパルス光源2、試料室3およびテラヘルツパルス検出器6から構成される。測定室1のテラヘルツパルス検出器6には、コンピュータ10Aが接続されている。図3において、図2(a)で説明したレーザー21および時間遅延装置27を図示省略した。

【0019】試料室3の中には、半導体材料5の一点で測光する測光光学系3aと、半導体材料5を二次元平面上で移動させる機械的走査機構4(例えば、X-Yステージ)とが収納されており、テラヘルツ周波数領域における半導体材料5の二次元投影画像を得るための走査が行われる。

【0020】半導体材料5は機械的走査機構4によって支持されている。機械的走査機構4を用い、半導体材料5を集光光束の光軸L3にはぼ直交するX-Y面に沿って走査することで、半導体材料5の各点からの透過パル

ス光をテラヘルツパルス検出器6で順次受光することができる。そして、コンピュータ10Aにおいて、半導体材料5の各点からの電場強度を空間的に合成することによって、電場強度の二次元分布が得られる(透過イメージ)。

【0021】コンピュータ10Aは、計測・記憶装置7と、データ処理装置8と、演算装置9と、画像処理装置10とで構成されている。計測・記憶装置7は、一画素毎に、テラヘルツパルス検出器6から出力される電場強度の時系列信号を計測して記憶する装置である。データ処理装置8は、一画素毎に電場強度の時系列信号をフーリエ変換し、周波数スペクトルに変換する演算を行い、分光透過率を得る装置である。計測・記憶装置7およびデータ処理装置8はテラヘルツ時間領域計測手段に対応する。

【0022】演算装置9(演算手段)は、データ処理装置8で求めた分光透過率の周波数依存性から、後述するドルーデの光吸収理論を利用して、半導体材料5の電気的特性パラメータ(キャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度)を算出する装置である。画像処理装置10は、演算装置9で得られた各画素に対応する数値データをコンピュータで再構成し、二次元画像化する装置である(画像処理手段)。さらに、画像処理装置10は、線型変換演算を行い、複数枚の二次元投影画像から三次元断層像を合成する装置でもある(請求項7のコンピュータグラフィック手段)。

【0023】図4は、時系列透過イメージ(a)から分光特性(b)が得られる原理を説明するための概念図である。時間遅延装置27(図2(a))の Δt を0に設定し、半導体材料5をX-Y走査することで全画素について(つまり $i \times j$ 回)電場強度を測定すれば、時刻 t_0 における透過パルス光のX-Y面内の電場強度分布(透過イメージ)31が得られる。時間遅延装置27の時間遅延を $t_0 + \Delta t = t_1$ と設定し、同様に電場強度を測定すれば、時刻 t_1 における透過イメージ32が得られる。このように、遅延時間 Δt を変えることによって、任意の時刻($t_0 \sim t_k$)における透過イメージ31, 32, ...が計測できる。

【0024】このようにして得られた時系列透過イメージ31, 32, ...の数値データを、ある画素(a_{ij})に注目して時間軸に沿って見ると、図4(a)に示すように、時刻 t_0 から時刻 t_k までの時系列波形 $E(t, i, j)$ が得られる。時間遅延装置27を導入することにより、X-Y面内の透過パルス光の電場強度分布の時間変化があたかもムービーのように見られる。

【0025】以上の操作により、計測・記憶装置7において各画素(a_{ij})毎の電場強度の時系列波形 $E(t, i, j)$ が得られたので、さらに、データ処理装置8では、計測・記憶装置7に記憶された時系列波形 $E(t, i, j)$ を各画素(a_{ij})毎にフーリエ変換演算する。この結果、

図4(b)に示すように、半導体材料5の各画素(a_{ij})における分光特性 $E(\omega, i, j)$ が得られる。この数値データを画像処理装置10で再構成すれば、 ω_0 から ω_k の周波数にわたるX-Y面内の電場強度イメージ、すなわち二次元投影画像(分光画像)が得られる。

【0026】また、一連の二次元投影画像には半導体材料5の電気的特性に係わる情報が含まれており、演算装置9において、後述するドルーデの光吸収理論を利用して解析することにより、半導体材料の電気的特性の物性量に関する二次元投影画像情報に変換できる。なお、半導体材料5をX-Y走査せずに、測光光学系3a(テラヘルツパルス光を半導体材料5に照射すると共に、半導体材料5からの透過パルス光をテラヘルツパルス検出器6へ導く光学系)を連動動作させても、同様に透過イメージ31, 32, ...が得られる。

【0027】以上述べた装置を使用して、半導体材料5のキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度を算出するための解析方法を図5および図6を用いて説明する。図5は、本発明の電気特性評価装置による解析手法の一つの過程を説明するための図である。図6は、半導体材料5の電気的物性値(キャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度等)を算出するための解析方法の手順を示すプロセス図である。この解析手順では、ドルーデの光吸収理論が用いられる。簡単のために一画素について考える。

【0028】テラヘルツパルス光を半導体材料5の一点(一画素に相当)に照射し、半導体材料5から透過してきたテラヘルツパルス光(透過パルス光)の電場強度の時系列波形 $E(t)$ を記録し(計測・記憶装置7)、そのフーリエ変換から光の振幅 $|E(\omega)|$ と位相 θ とを算出する(データ処理装置8)。同様に、位相の周波数特性も得られる。

【0029】ここで、時系列波形 $E(t)$ と光の振幅 $|E(\omega)|$ と位相 θ との関係は、次式(1)のフーリエ変換で

$$E(\omega) = \frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)} = \frac{4n}{(1+n)^2} \exp\left[i\left(\frac{(n-1)\omega}{c}d\right)\right] \exp\left(-\frac{k\omega}{c}d\right) \quad (3)$$

また、上記の式(2)と式(3)とを比較することにより、次の式(4)と式(5)とが得られる。式(4)および式(5)の左辺は実測量であるから、半導体材料5の厚み d が既知であれば、式(4)から n が計算でき、式(5)から k が計算できる。つまり、半導体材料5の複素屈折率 $n + ik$ が求められる(図6のS2)。

【数4】

$$\theta_{sam} - \theta_{ref} = \frac{(n-1)\omega}{c}d \quad (4)$$

$$\frac{|E_{sam}(\omega)|}{|E_{ref}(\omega)|} = \frac{4n}{(1+n)^2} \exp\left(-\frac{k\omega}{c}d\right) \quad (5)$$

定義される。

【数1】

$$E(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(-i\omega t) dt = |E(\omega)| \exp(i\theta) \quad (1)$$

測定の順序としては、まず、図5(a)に示すように、測光光学系3aの光路に半導体材料5(被測定物)を挿入しない状態で、電場強度の時系列波形 $E_{ref}(t)$ を測定し(計測・記憶装置7)、これをフーリエ変換して参照用の振幅 $|E_{ref}(\omega)|$ および位相 θ_{ref} を得る(データ処理装置8)。

【0030】次に、図5(b)に示すように、半導体材料5を測光光学系3aの光路に挿入した状態で、電場強度の時系列波形 $E_{sam}(t)$ を測定し(計測・記憶装置7)、これをフーリエ変換して被測定物挿入時の振幅 $|E_{sam}(\omega)|$ および位相 θ_{sam} を得る(データ処理装置8)。以下、半導体材料5を透過した透過パルス光あるいは透過イメージを例として詳細に説明する。

【0031】半導体材料5の複素振幅透過率 $t(\omega)$ は、次式(2)で定義される。 $E_{sam}(\omega)$ および $E_{ref}(\omega)$ は、それぞれ、半導体材料5を測光光学系3aの光路に挿入した時(図5(b))と挿入しない時(図5(a))の光の電場強度のフーリエ成分であり、実測される量である。式(2)の複素振幅透過率 $t(\omega)$ は、 $E_{sam}(\omega)$ と $E_{ref}(\omega)$ との比で表されるため、同様に実測される量である(図6のS1)。

【数2】

$$t(\omega) = \frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)} = \frac{|E_{sam}(\omega)|}{|E_{ref}(\omega)|} \exp[i(\theta_{sam} - \theta_{ref})] \quad (2)$$

一方、半導体材料5の複素屈折率を $n + ik$ で表すと、厚み d の半導体材料5を光路に挿入したとき(図5(b))の理論的な複素振幅透過率 $t(\omega)$ は、次式(3)で計算される(図6のS1)。ただし、 c は光速である。

【数3】

テラヘルツ時間領域計測手段(計測・記憶装置7、データ処理装置8)は、これまでの光計測のように光の強度(すなわち電場の二乗)を計測せずに、光の振幅と位相に係る情報を直接計測できる特徴を持つ(B.B.Hu and M.C.Nuss, OPTICS LETTERS Vol.20, No.16, P.1716, (1995))。このため従来のように、クラマースクロニッヒ(Kramers-Kronig)の式(工藤恵栄 著、「光物性の基礎」オーム社)を用いた複雑な計算を行わなくても、半導体材料5の複素屈折率 $n + ik$ を計算できる。

【0032】さらに、半導体材料5の複素屈折率 $n + ik$ と複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ の一般的な関係は、次式(6)で表される(図6のS3)。

【数5】

$$\tilde{n} = n + ik = \sqrt{\varepsilon(\omega)} \quad (6)$$

また、半導体材料5に不純物を添加してキャリアを生成した場合のドルーデの光吸収理論から導かれる複素誘電率 $\varepsilon(\omega)$ は、次式(7)のように表される。

【数6】

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{4\pi Ne^2}{m^*} \frac{1}{\omega(\omega + i/\tau)} \quad (7)$$

上記の式(6)と式(7)との関係から、次の式(8)および式(9)が得られる(図6のS4)。式(8)における光学的な誘電率 ε_{∞} と、式(8)、式(9)におけるキャリアの有効質量 m^* とは物質定数であり、その値は元素半導体(Si, Ge)や化合物半導体によって異なる。

【数7】

$$n^2 - k^2 = \varepsilon_{\infty} - \frac{4\pi Ne^2}{m^*} \frac{\tau^2}{(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (8)$$

$$2nk = \frac{4\pi Ne^2}{m^*} \frac{\tau}{\omega(1 + \omega^2 \tau^2)} \quad (9)$$

テラヘルツ時間領域計測手段(計測・記憶装置7、データ処理装置8)によって半導体材料5の複素屈折率 $n + ik$ が実測できる(図6のS2)ため、上記式(8)および式(9)における未知数は、キャリア密度 N とキャリアの散乱時間 τ とである。

【0033】上記式(8)および式(9)から、キャリアの散乱時間 τ と複素屈折率 $n + ik$ との関係は、次の式(10)で表される。

【数8】

$$\tau = \frac{\varepsilon_{\infty} - n^2 + k^2}{2nk\omega} \quad (10)$$

したがって、演算装置9における演算によって、上記の式(10)からキャリアの散乱時間 τ が求まり、式(9)の関係からキャリア密度 N の値が得られる(図6のS5)。

【0034】さらに、演算装置9では、得られたキャリア密度 N およびキャリアの散乱時間 τ の値をオームの法則(次の式(11)～式(13))に代入することにより(図6のS6)、移動度 μ 、抵抗率 ρ 、電気伝導度 σ を算出することができる(S7)。

【数9】

$$\mu = e\tau/m^* \quad (11)$$

$$\rho = 1/(Ne\mu) \quad (12)$$

$$\sigma = 1/\rho \quad (13)$$

以上の手順により得られた数値データから、濃淡画像化あるいはカラー画像化することにより、半導体の電気的

特性パラメータ(キャリア密度 N 、移動度 μ 、抵抗率 ρ 、電気伝導度 σ)に関する二次元投影画像が得られる(画像処理装置10)。

【0035】また、画像処理装置10では、テラヘルツパルス光が半導体材料5を照射する角度を変えて複数枚の二次元投影画像を取得し、ラドン変換に代表される線型変換演算を行うことにより、複数枚の二次元投影画像から、半導体材料5の電気的特性パラメータ(キャリア密度 N 、移動度 μ 、抵抗率 ρ 、電気伝導度 σ)に関する三次元断層像を得ることもできる。

【0036】図7は、二次元投影画像から三次元断層像を得る過程を示す概念図である。テラヘルツパルス光が半導体材料5を照射する角度を変えるには、X-Yステージ4に回転機構を付加してもよいし、別途に回転機構を設けてもよい。各々の回転角度での二次元投影画像から、ラドン変換で代表されるような線型変換演算をコンピュータ10A(画像処理装置10)上で行うことにより、三次元断層像を得ることができる。言わば、テラヘルツCT(Computerized Tomography)法である。

【0037】ラドン変換とは、一次元投影データを測定し、そこからもとの物体の二次元断面を再構成したり、二次元投影データを測定し、そこからもとの物体の三次元分布を再構成する手法である(河田聡/南茂夫 編著、「画像データ処理」CQ出版社)。以下、本発明の電気特性評価装置を用いて、半導体の電気的特性パラメータに関わる二次元投影画像を得る具体例を述べる。

【0038】図8は、本発明の実施の形態に係る走査型イメージング方式を用いた電気特性評価装置の部品構成を示す図である。フェムト秒可視光パルスレーザー(以下、可視光パルスレーザーという)21からの可視光パルスは、半透過ミラー28により2方向に分岐され、一方はテラヘルツパルス光源22を照射し、他方は時間遅延可動ミラー24に入射する。前者は、テラヘルツパルス光源22からテラヘルツパルス光22aを放射させ、後者は、時間遅延可動ミラー24によってテラヘルツパルス検出器26への到達時間を変えられ、サンプリングパルス21aとしてテラヘルツパルス検出器26に入射する。

【0039】テラヘルツパルス光22aを半導体ウエハ25の一点に照射する走査型イメージング測光方式に採用されるテラヘルツパルス光源22としては、一般的に半導体光スイッチ素子が用いられる。

【0040】半導体光スイッチ素子は、可視光パルスレーザー21からの可視光パルス21bが照射されたときに高速光応答をする半導体材料上に、アンテナ(例えば金属合金アンテナ)を形成したものである。可視光パルス21bは、前述の「入力パルス」と称したものである。テラヘルツパルス光22aを発生させるには、この他に、化合物半導体に可視光パルスを照射することによっても実現できる。

【0041】測光光学系23aを構成するテラヘルツ光学素子(軸外し放物面鏡)には、酸化防止を施したアルミ蒸着ミラー、金蒸着ミラー、銀蒸着ミラーが一種類以上用いられる。また、測光光学系23aは、シリコンレンズ、ゲルマニウムレンズ、ポリエチレンレンズ等と組み合わせて構成することもできる。偏光子としては、ワイヤグリッドが用いられる。

【0042】テラヘルツパルス検出器26には、テラヘルツパルス光源22と同じ型の半導体光スイッチ素子が用いられる。この半導体光スイッチ素子には、透過パルス光25aのみが照射されてサンプリングパルス21aが照射されないとき、電場が誘起される。このときの半導体光スイッチ素子には電流は流れない。しかし、透過パルス光25aが照射されている半導体光スイッチ素子にサンプリングパルス21aが照射されると、そのときのサンプリングパルス21aがトリガーとなって、サンプリングパルス21aによる光生成キャリアが生じ、半導体ウエハ25からの透過パルス光25aを受光したことによる電場強度に応じた電流が流れる。この電流をロックイン増幅器(不図示)で増幅して、前述の計測・記憶装置7(図3)に電流値(\propto 電場強度値)を記憶させる。

【0043】ここで、電流値とは、半導体ウエハ25からの透過パルス光25aの電場強度に比例する。計測・記憶装置7では、透過パルス光25aの電場強度を計測する。さらに、計測・記憶装置7では、サンプリングパルス21aを送るタイミングを時間遅延可動ミラー24により変化させながら電流値を読み取り、透過パルス光25aの電場強度を計測してゆく。

【0044】具体的には、サンプリングパルス21aをテラヘルツパルス検出器26に入力する時刻を Δt づつずらして、その度に透過パルス光25aの電場強度を読み込む。この動作を k 回繰り返すことにより、時刻 t_0 から時刻 t_k までの間(図4(a))にわたり電場強度が読み込まれる。さらに、二次元投影画像を取得するために、半導体ウエハ25の全面にわたって上記動作を必要な画素数に相当する回数($i \times j$ 回)繰り返す。

【0045】なお、時刻 t_0 に固定して全画素の電場強度を読み込んだ後に、サンプリングパルス入力時刻を Δt づつずらして全画素の電場強度を読み込むという方法もある。読み込まれた電場強度の数値データは計測・記憶装置7(図3)に保存される。その結果、図9に示すような透過パルス光25aの電場強度の時系列波形が得られる。図9は、1つの画素(a_{ij})に注目して時間軸に沿って見た電場強度の時系列波形の一例である。2本の曲線 $E_{sam}(t)$ 、 $E_{ref}(t)$ は、測光光学系23aの光路に半導体材料25を挿入したときと挿入しないときの波形を表す。

【0046】この時系列波形をデータ処理装置8(図3)でフーリエ変換することにより、式(1)で定義され

た電場強度の振幅と位相の周波数依存性が得られる。図10は、電場強度の振幅の周波数依存性を示すグラフである。2本の曲線 $|E_{sam}(\omega)|$ 、 $|E_{ref}(\omega)|$ は、測光光学系23aの光路に半導体材料25を挿入したときと挿入しないときの時系列波形に対応する。同様に、電場強度の位相の周波数特性も得られる。

【0047】測定の順序としては、まず、測光光学系23a(図8)の光路に半導体材料25を入れないで時系列波形 $E_{ref}(t)$ を測定し、参照用の振幅 $|E_{ref}(\omega)|$ および位相 θ_{ref} を得る。次に、半導体材料25を光路に挿入した状態で時系列波形 $E_{sam}(t)$ を測定し、被測定物挿入時の振幅 $|E_{sam}(\omega)|$ および位相 θ_{sam} を得る(図9、図10参照)。

【0048】そして、得られた $|E_{ref}(\omega)|$ 、 $|E_{sam}(\omega)|$ 、 θ_{ref} 、 θ_{sam} の測定値を次の式(14)および式(15)に代入することにより、半導体材料25の複素屈折率 $n + ik$ を求めることができる。式(14)、式(15)は、上記の式(4)、式(5)を変形したものである。

【数10】

$$n = \frac{(\theta_{sam} - \theta_{ref})}{d} \frac{c}{\omega} + 1 \quad (14)$$

$$k = -\frac{c}{\omega d} \ln \left[\frac{(1+n)^2}{4n} \frac{|E_{sam}(\omega)|}{|E_{ref}(\omega)|} \right] \quad (15)$$

さらに、求めた複素屈折率 $n + ik$ を上記の式(10)に代入すれば、キャリアの散乱時間 τ が求められる。キャリアの散乱時間 τ が求めれば、上記の式(9)を利用してキャリア密度 N が求まり、上記の式(11)～式(13)を利用することにより、移動度 μ 、抵抗率 ρ 、電気伝導度 σ が算出される。得られた電気的特性に関するパラメータの値を濃淡画像やカラー画像によって表示すれば二次元投影画像が得られる。

【0049】図11は、半導体ウエハの中の電気的特性が異なる領域を可視光で見た時の写真(a)と、テラヘルツパルス光で見た時の二次元投影画像(b)である。図11(b)は、電気的特性パラメータである抵抗率 ρ に対する二次元投影画像を示したものであり、左半分と右半分のコントラストの違いは抵抗率 ρ の違いを示しており、それぞれ n 型半導体と p 型半導体になっていることを明確に示している。

【0050】本実施形態から、本発明の電気特性評価装置は、半導体材料の電気的特性パラメータの評価法に対して強力な手段となることが示された。以上では、走査型イメージング方式の実施形態について述べたが、結像光学系を使った非走査型イメージング方式を採用することにより計測時間を大幅に短縮できる。

【0051】次に、もう一つの測光光学系である非走査型イメージング方式について説明する。図12は、非走査型イメージング測光方式を説明するための模式図であ

る。図示のように、この方式は、テラヘルツパルス光のビーム径を広げて拡大光束とし、半導体材料15の全体に一括照射して透過イメージを得るものである。

【0052】そして、透過パルス光のX-Y面内の電場強度分布をイメージングカメラ36（結像光学系+二次元撮像デバイス）およびコンピュータ20Aを用いて一括で計測する。この方式の長所は、被測定物（半導体材料15）を機械的走査機構を用いて移動させる必要がないので、極めて短時間で透過イメージを得ることができる点にある。

【0053】時間遅延装置（不図示）からイメージングカメラ36に送るサンプリグパルスのタイミング Δt を変化させながらX-Y面内の電場強度分布を計測することで、時系列透過イメージが得られる。コンピュータ20Aでは、走査型イメージング測光方式の場合と同様のフーリエ変換演算を行うことにより、二次元投影画像（分光画像）を得ることができる。また、半導体材料15のテラヘルツパルス光に対する角度を変えて、各角度での二次元投影画像からラドン変換で代表されるような線型変換演算をコンピュータ上で行うことにより、三次元断層像を得ることができる。

【0054】図13は、本発明の非走査型イメージング手法による電気特性評価装置の概略構成図である。測定室11は、テラヘルツパルス光源12、試料室13およびイメージ検出器16（二次元撮像デバイス）から構成される。測定室11のイメージ検出器16には、コンピュータ20Aが接続されている。試料室13の中には、半導体材料15の全体で測光する測光光学系13aと、半導体材料15からの透過パルス光を結像する結像光学系14とが収納されており、これらはテラヘルツ周波数領域における半導体材料15の二次元投影画像を一括で得るための光学系である。

【0055】テラヘルツパルス光源12から発生したテラヘルツパルス光は、測光光学系13aにより拡大光束となり、半導体材料15の全体に一括照射され、半導体材料15を透過して結像光学系14で結像され、イメージ検出器16（光検出手段）に入射する。先に述べたように、イメージ検出器16は、透過イメージを一括で検出し、電場強度に比例する信号をコンピュータ20Aへ送出する。

【0056】コンピュータ20Aは、計測・記憶装置17と、データ処理装置18と、演算装置19と、画像処理装置20とで構成されている。計測・記憶装置17は、イメージ検出器16によって検出された透過イメージを取り込み、透過パルス光の電場強度分布を求めると共に、その時系列波形を計測し記憶する装置である。データ処理装置18は、一画素毎に時系列波形のフーリエ変換演算を行い、周波数スペクトルに変換して分光透過率画像（分光画像）を得る装置である。計測・記憶装置17およびデータ処理装置18はテラヘルツ時間領域計

測手段に対応する。

【0057】演算装置19（演算手段）は、データ処理装置18で求めた分光透過率画像から、後述するドルーデの光吸収理論を利用して、半導体材料15中のキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度を算出する装置である。画像処理装置20は、演算装置19によって得られた上記の数値データを用いて、電気特性に関する二次元投影画像（分光画像）を得るための装置である（画像処理手段）。さらに、画像処理装置20は、二次元投影画像をコンピュータ上でデジタル画像処理を行い再構成して、半導体材料内部の三次元断層像を再生する装置でもある（請求項8のコンピュータグラフィックス手段）。

【0058】非走査型イメージング方式の問題点は、テラヘルツパルス光のイメージ検出器16であり、現在のところテラヘルツパルス光を直接受光できる二次元撮像デバイスは存在しない。しかしながら、文献(Q.Wu et. al, Appl. Phys. Lett. Vol. 69, No. 8, P. 1026 (1996))において指摘されている電気光学サンプリグ方式を採用することにより、リアルタイムのテラヘルツイメージングが可能となる。

【0059】原理的には、電気光学結晶で作られたイメージングプレート上に半導体材料のテラヘルツ透過イメージを映し出し、テラヘルツパルス光の電場強度に依存して電気光学結晶の屈折率が変化するポッケルス効果を利用してテラヘルツパルス光のイメージ情報を可視光の偏光情報に変換して画像化する方法である。この計測手段とドルーデの光吸収理論を用いた解析手段を兼ね備えた装置を構成することにより、半導体材料の電気特性評価をリアルタイムで行うことが可能となる。

【0060】また、上記実施形態では、半導体材料のキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度を算出するに当たって、ドルーデの光吸収理論を用いる解析方法（図6）を説明したが、ドルーデの光吸収理論に代えて、半導体材料内部の格子振動と自由キャリアの存在を考慮した誘電関数理論を用いることもできる。誘電関数理論の適用は、格子振動が赤外活性な（赤外線電磁波を吸収する）化合物半導体に対して特に有効である。

【0061】図14は、走査型イメージング手法による電気特性評価装置の概略構成図である。図14に示す測定室41とコンピュータ45A内の計測・記憶装置42、データ処理装置43、画像処理装置45とは、各々、図3に示す測定室1、計測・記憶装置7、データ処理装置8、画像処理装置10と構成が同じである。ここでは、図14に示す電気特性評価装置の特徴箇所である演算装置44について主に説明する。

【0062】演算装置44（演算手段）は、データ処理装置43で得られた分光透過率の周波数依存性から、後述する誘電関数理論を利用して、半導体材料5のキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度を算出する装置で

ある。演算装置44によって得られた数値データは、画像処理装置45において、二次元投影画像化され、さらに、コンピュータ上でのデジタル画像処理によって再構成されて、半導体材料内部の三次元断層像が再生される。

【0063】図15は、図14の電気特性評価装置において、半導体材料5の電気的物性値（キャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度等）を算出するための解析方法の手順を示すプロセス図である。図15に示す解析手順のうちS11～S13、S15～S17は、各々、図6に示すS1～S3、S5～S7と同じである。ここで

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{S\omega_{T0}^2}{\omega^2\tau_0 - \omega^2 - i\omega\gamma} - \frac{4\pi Ne^2}{m^*} \frac{1}{\omega(\omega + i/\tau)} \quad (16)$$

上記の式(6)と式(16)との関係から、次の式(17)および式(18)が得られる（図15のS14）。式(17)、式(18)における光学的な誘電率 ϵ_{∞} と、光学的な格子振動の振動数 ω_{T0} と、減衰因子 γ と、振動子強度 S

$$n^2 - k^2 = \epsilon_{\infty} + \frac{S\omega_{T0}^2(\omega_{T0}^2 - \omega^2)}{(\omega_{T0}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} - \frac{4\pi Ne^2}{m^*} \frac{\tau^2}{(1 + \omega^2\tau^2)} \quad (17)$$

$$2nk = \frac{S\omega_{T0}\omega\gamma}{(\omega_{T0}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2} + \frac{4\pi Ne^2}{m^*} \frac{\tau}{\omega(1 + \omega^2\tau^2)} \quad (18)$$

テラヘルツ時間領域計測手段（図14の計測・記憶装置42およびデータ処理装置43）によって半導体材料の複素屈折率 $n + ik$ が実測できる（図15のS12）ため、上記式(17)および式(18)における未知数は、キャリア密度 N とキャリアの散乱時間 τ とである。

$$\tau = \frac{1}{\omega} \left(\frac{(\epsilon_{\infty} - n^2 + k^2) \{ (\omega_{T0}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2 \} + S\omega_{T0}^2(\omega_{T0}^2 - \omega^2)}{2nk \{ (\omega_{T0}^2 - \omega^2)^2 + \omega^2\gamma^2 \} - S\omega_{T0}\omega\gamma} \right) \quad (19)$$

したがって、上記の式(19)からキャリアの散乱時間 τ が求まり、式(18)の関係からキャリア密度 N の値が得られる（図15のS15）。

【0066】さらに、得られたキャリア密度 N およびキャリアの散乱時間 τ の値をオームの法則（上記の式(11)～式(13)）に代入することにより（図15のS16）、移動度 μ 、抵抗率 ρ 、電気伝導度 σ を算出することができる（S17）。

【0067】以上の手順により得られた数値データは、図14の演算装置44から画像処理装置45に出力され、画像処理装置45において濃淡画像化あるいはカラー画像化することにより、半導体の電気的特性パラメータ（キャリア密度 N 、移動度 μ 、抵抗率 ρ 、電気伝導度 σ ）に関する二次元投影画像が得られる。また、テラヘルツパルス光が半導体材料を照射する角度を変えて何枚かの二次元投影画像を取得し、ラドン変換に代表される線型変換演算を行うことにより、半導体材料の電気的特性パラメータ（キャリア密度 N 、移動度 μ 、抵抗率 ρ 、

は、図15に示すS14（誘電関数理論を用いるステップ）について主に説明する。簡単のために一画素について考える。

【0064】図15のS11、S12を経て求められた半導体材料の複素屈折率 $n + ik$ と、複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ との一般的な関係は、既に述べたように、上記式(6)で表される（図15のS13）。また、半導体材料（化合物半導体材料）に不純物を添加してキャリアを生成した場合の誘電関数理論から導かれる複素誘電率 $\epsilon(\omega)$ は、次式(16)のように表される。

【数11】

と、キャリアの有効質量 m^* とは物質定数であり、その値は化合物半導体によって異なる。

【数12】

【0065】上記式(17)および式(18)を連立させることにより、キャリアの散乱時間 τ と複素屈折率 $n + ik$ との関係は、解析的に、次の式(19)で表される。

【数13】

電気伝導度 σ ）に関する三次元断層像が得られる（画像処理装置45）。

【0068】なお、上記式(17)および式(18)における2つの未知数（キャリア密度 N 、キャリアの散乱時間 τ ）を求めるに当たっては、未知数（ N 、 τ ）を最適化パラメータとして使い、一般的な非線形最小二乗法などの最適化演算を行ってもよい。また、上記した走査型イメージング方式（図14）に限らず、結像光学系を使った非走査型イメージング方式を採用した場合でも、半導体材料（化合物半導体材料）のキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度を算出するに当たって誘電関数理論を用いることができる。

【0069】図16は、非走査型イメージング手法による電気特性評価装置の概略構成図である。図16に示す測定室51とコンピュータ55A内の計測・記憶装置52、データ処理装置53、画像処理装置55とは、各々、図13に示す測定室11、計測・記憶装置17、データ処理装置18、画像処理装置20と構成が同じであ

る。ここでは、図16に示す電気特性評価装置の特徴箇所である演算装置54について主に説明する。

【0070】演算装置54（演算手段）は、データ処理装置53で得られた分光透過率画像（分光画像）から、上述した誘電関数理論を利用して、半導体材料15のキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度を算出する装置である。演算装置54によって得られた数値データは、画像処理装置55において、二次元投影画像化され、さらに、コンピュータ上でのデジタル画像処理によって再構成されて、半導体材料内部の三次元断層像が再生される。

【0071】この非走査型イメージング方式によれば、テラヘルツパルス光を半導体材料15の全体に一括照射すると共に、透過パルス光のX-Y面内の電場強度分布（透過イメージ）を一括で計測するため、計測時間を大幅に短縮できる。上記した実施形態では、半導体材料を透過したテラヘルツパルス光（透過パルス光、透過イメージ）から分光透過率または分光透過率画像を求め、半導体材料の電気特性パラメータを測定・評価する装置について具体的に説明したが、本発明は、半導体材料で反射したテラヘルツパルス光（反射パルス光、反射イメージ）から分光反射率または分光反射率画像を求め、半導体材料の電気特性パラメータを測定・評価する装置にも適用できる。

【0072】

【発明の効果】本発明の電気特性評価装置および電気特性評価方法によれば、半導体材料の電気的特性に敏感なテラヘルツ周波数領域の光を用い、透過または反射してきたテラヘルツパルス光の情報に基づいて半導体材料の電気的特性に係わるキャリア密度、移動度、抵抗率、電気伝導度を算出できる。したがって、半導体材料の破壊や接触を全くともなわずに、簡便且つリアルタイムな測定・評価が可能となる。

【0073】また、テラヘルツ時間領域計測手段とドレーデの解析手法または誘電関数理論を利用することにより、半導体材料の複素屈折率から光吸収係数が容易に算出できる。また、電気的物性値の空間分布として二次元画像化することにより、測定・評価時間の短縮が図れる。

【0074】また、集光光束を用い、機械的走査機構を備えることにより、半導体材料の測定領域を任意に選択することができる。また、半導体材料全面に一括照射する拡大光束を用い、拡大光束が照射された半導体材料全面からの透過パルス光または反射パルス光を一括で検出する二次元光検出手段を備えることにより、短時間で光検出が完了する。

【図面の簡単な説明】

【図1】本実施形態の電気特性評価装置の走査型イメージング測光方式を説明するための模式図である。

【図2】本実施形態の電気特性評価装置による時系列波

形計測の原理を説明するためのブロック図である。

【図3】本実施形態の走査型イメージング測光方式の電気特性評価装置の全体構成図である。

【図4】本実施形態の電気特性評価装置による時系列透過イメージ(a)と分光特性(b)の関係を示す図である。

【図5】本実施形態の電気特性評価装置による解析手法の原理を示す図である。

【図6】本実施形態の電気特性評価装置による解析手法（ドレーデの光吸収理論を用いた手法）を示すプロセス図である。

【図7】本実施形態の電気特性評価装置によって三次元断層像を得る過程を示す概念図である。

【図8】本実施形態の走査型イメージング測光方式の電気特性評価装置の部品構成を示す全体図である。

【図9】本実施形態の電気特性評価装置によって得られた電場強度の時系列波形である。

【図10】本実施形態の電気特性評価装置によって得られた電場振幅の周波数依存性のグラフである。

【図11】本実施形態の電気特性評価装置によって得られた半導体の電気的特性を表す画像である。

【図12】本実施形態の電気特性評価装置の非走査型イメージング測光方式を説明するための模式図である。

【図13】本実施形態の非走査型イメージング測光方式の電気特性評価装置の全体構成図である。

【図14】走査型イメージング測光方式を用いた電気特性評価装置の別の構成を示す図である。

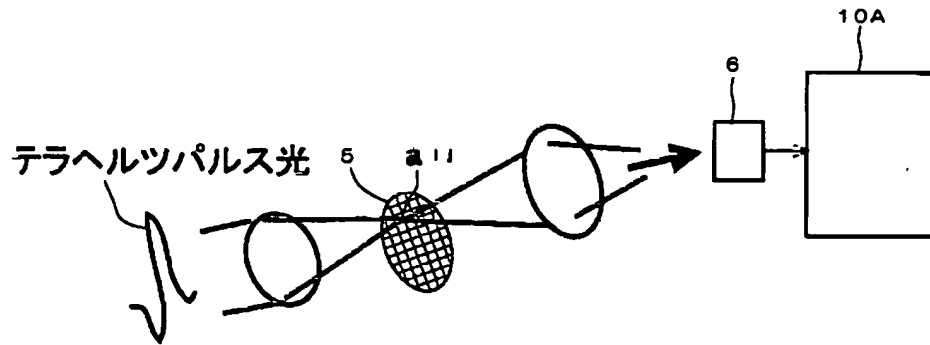
【図15】電気特性評価装置による別の解析手法（誘電関数理論を用いた手法）を示すプロセス図である。

【図16】非走査型イメージング測光方式を用いた電気特性評価装置の別の構成を示す図である。

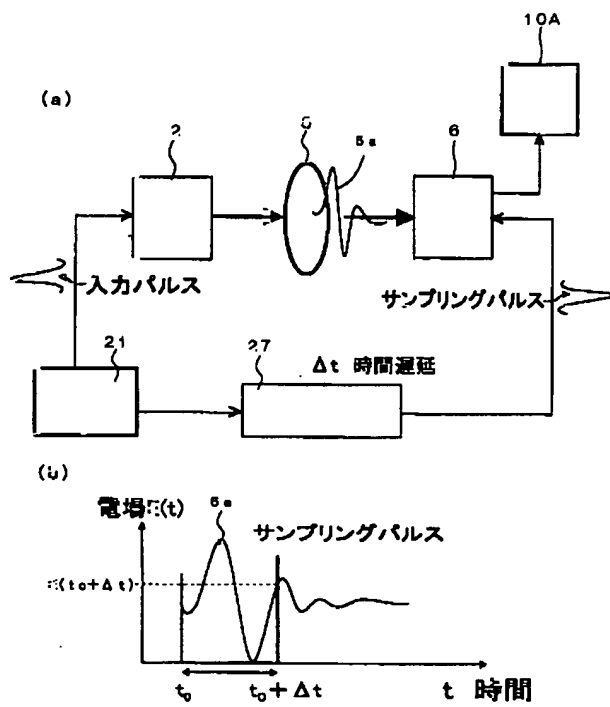
【符号の説明】

- 1, 11, 41, 51 測定室
- 2, 12, 22 テラヘルツパルス光源
- 3, 13 試料室
- 3a, 13a, 23a 測光光学系
- 4 機械的走査機構（X-Yステージ）
- 5, 15, 25 半導体材料
- 6, 26 テラヘルツパルス検出器
- 7, 17, 42, 52 計測・記憶装置
- 8, 18, 43, 53 データ処理装置
- 9, 19, 44, 54 演算装置
- 10, 20, 45, 55 画像処理装置
- 10A, 20A, 45A, 55A コンピュータ
- 14 結像光学系
- 16 イメージ検出器
- 21 フェムト秒可視光パルスレーザー
- 24 時間遅延可動ミラー
- 27 時間遅延装置
- 28 半透過ミラー
- 36 イメージングカメラ

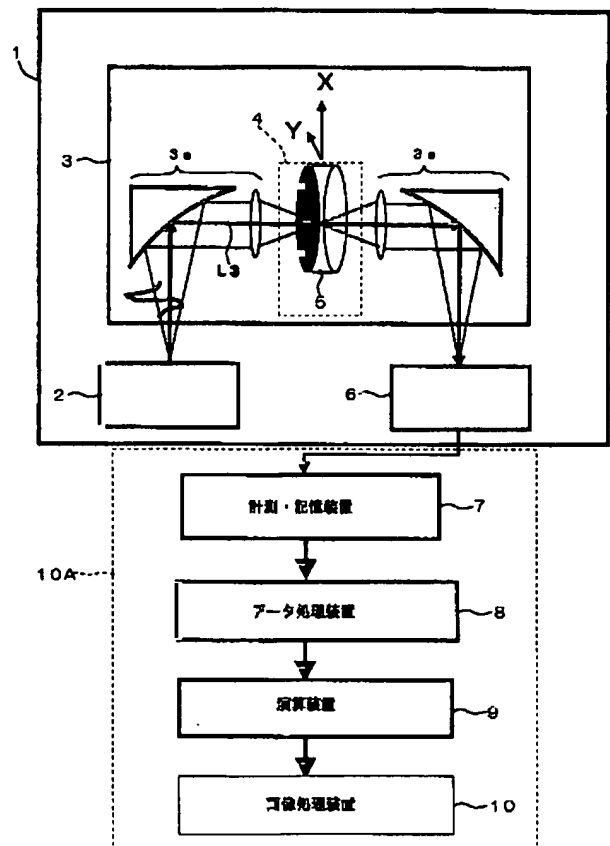
【図1】



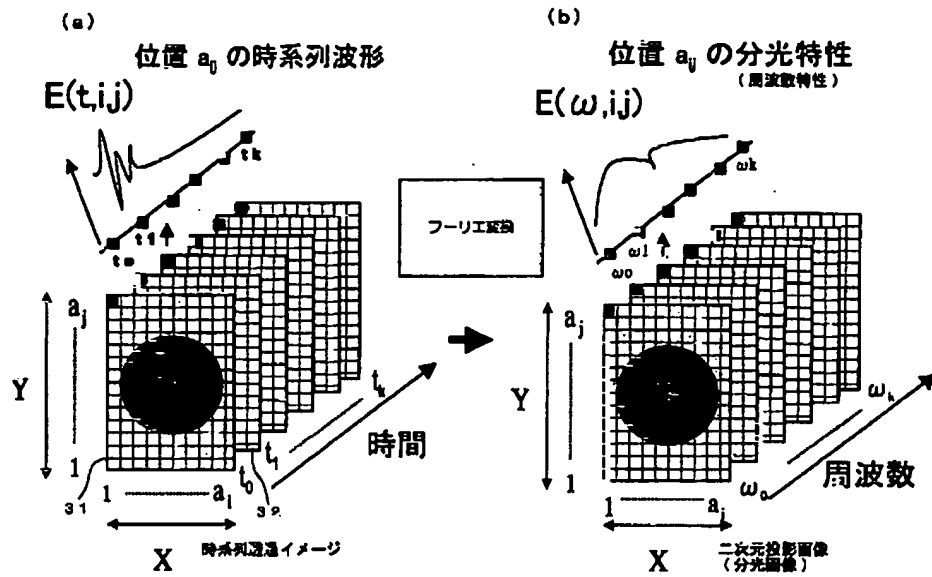
【図2】



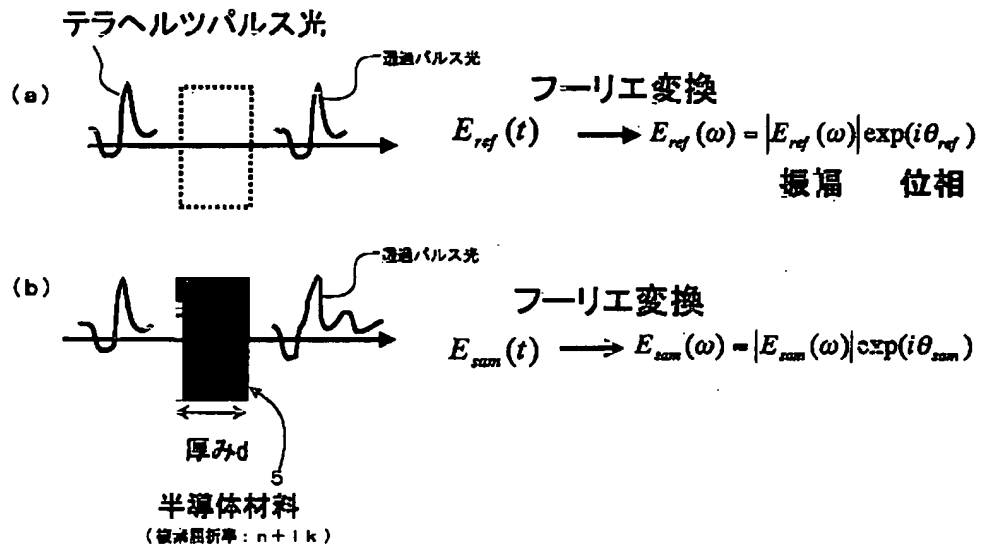
【図3】



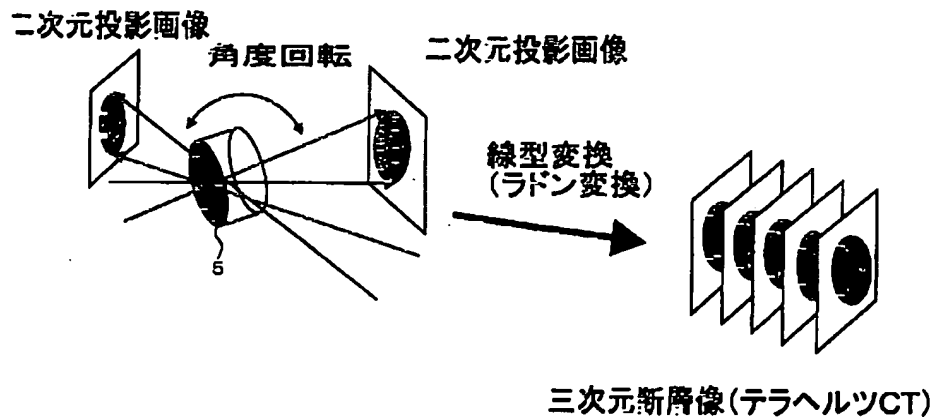
【図4】



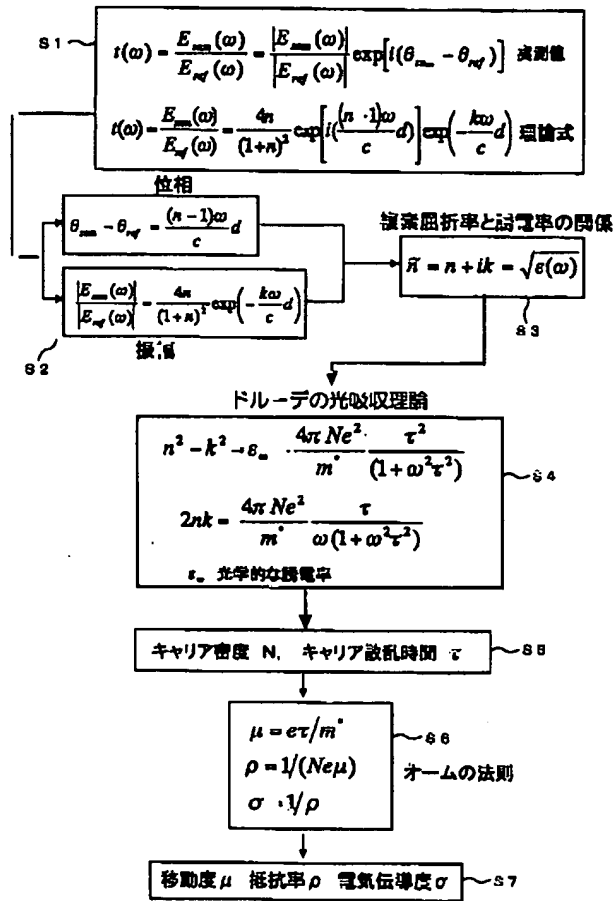
【図5】



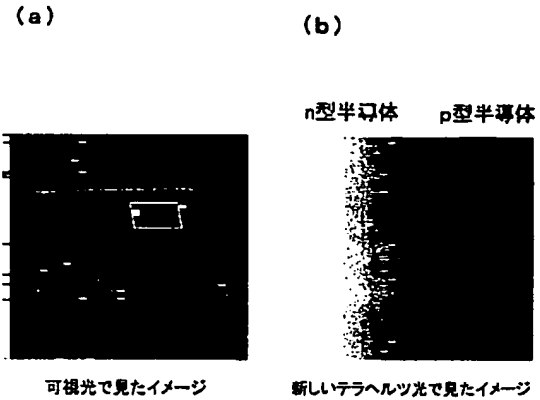
【図7】



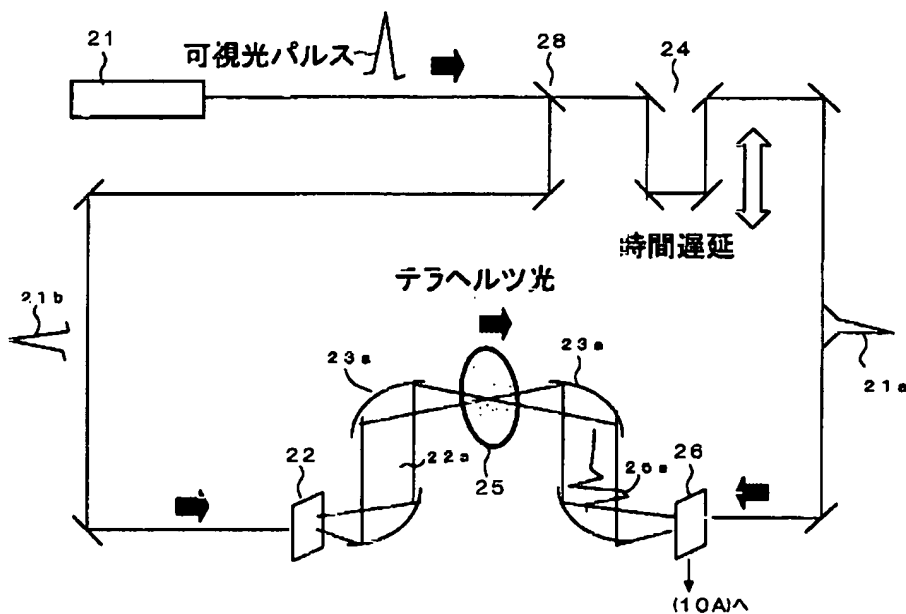
【図6】



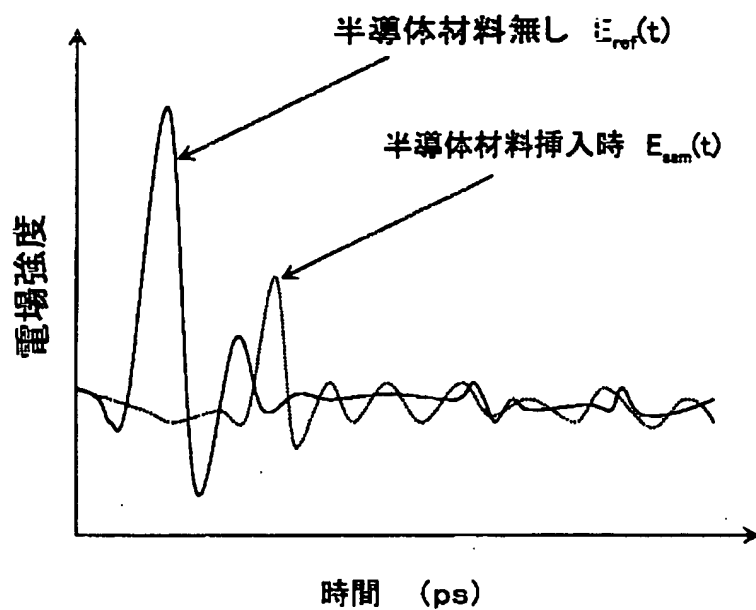
【図11】



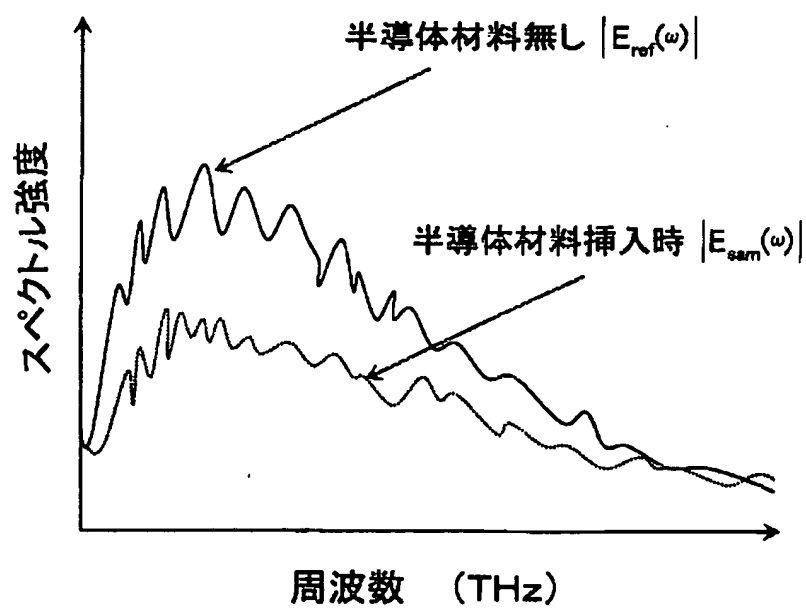
【図8】



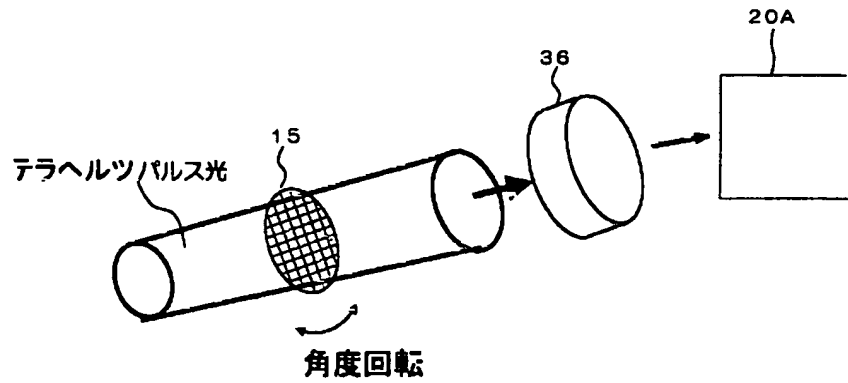
【図9】



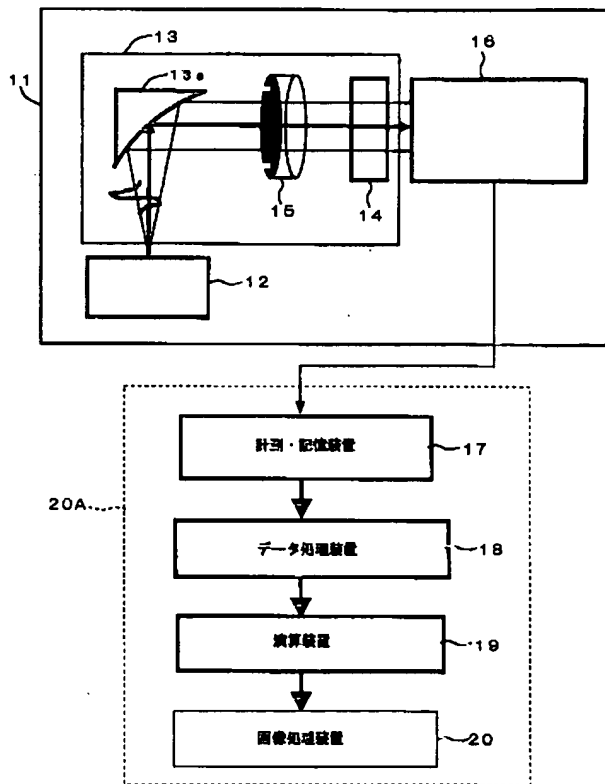
【図10】



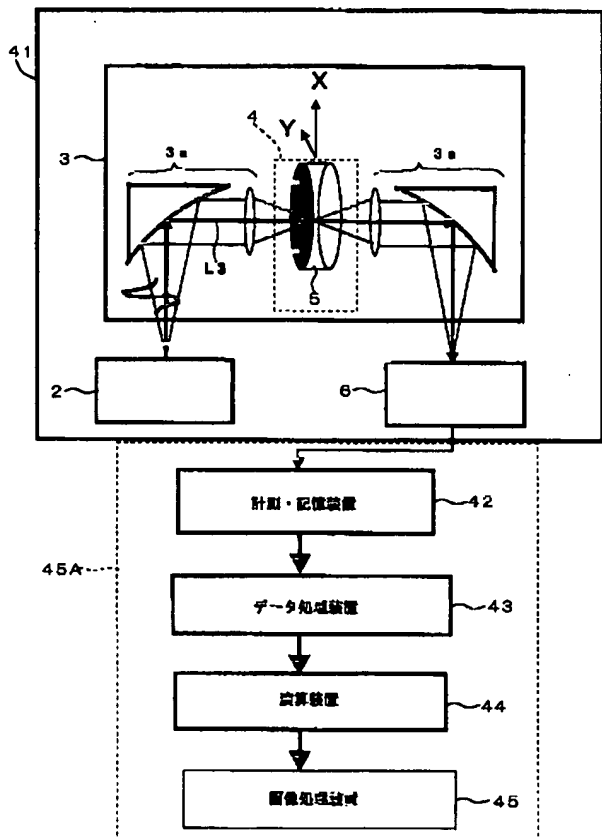
【図12】



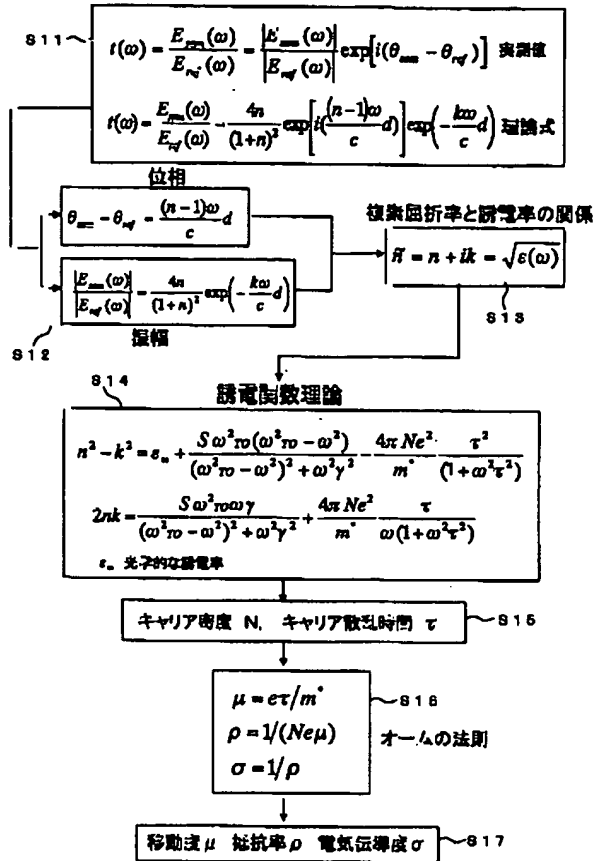
【図13】



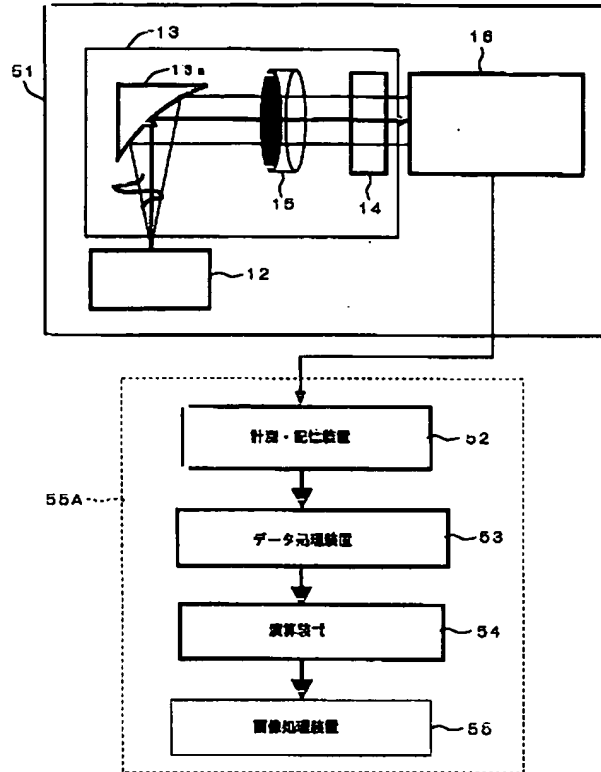
【図14】



【図15】



【図16】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2G059 AA05 BB16 CC20 DD13 EE01
 EE02 EE12 FF02 FF04 GG01
 GG08 HH02 JJ01 JJ11 JJ13
 KK04 MM01 MM09 MM10
 4M106 AA01 AA10 AA20 BA05 BA20
 CA10 CB01 CB12 DH09 DH12
 DH32 DJ04 DJ11 DJ23

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.